

Arbeitsgruppe Reaktorbetrieb
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen

Verwendung von Halbleiterzählern
zum Nachweis von geladenen Teilchen
und Neutronen

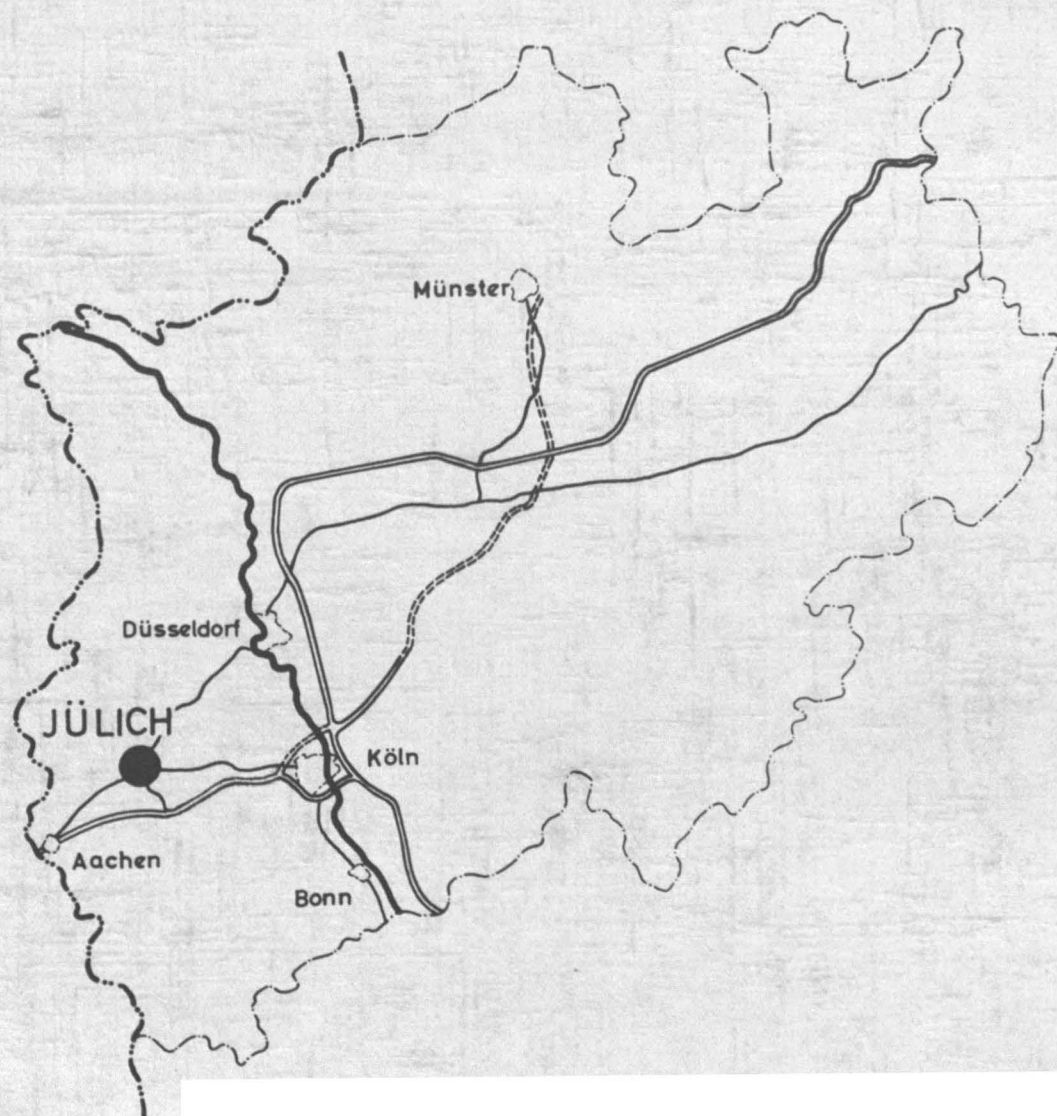
von

H. J. Bormann

JÜI - 20 - RE

September 1961

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 20

Arbeitsgruppe Reaktorbetrieb Jül – 20 – RE

Dok.: RADIATION DETECTION INSTRUMENTS * DK 539.1.074

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Verwendung von Halbleiterzählern
zum Nachweis von geladenen Teilchen
und Neutronen

von

H. J. Bormann

Dipl.-Phys. H. J. Bormann
Gruppe Reaktorbau-Betrieb

Jülich, den 30. 8. 1961

VERWENDUNG VON HALBLEITERZÄHLERN ZUM NACHWEIS VON GELADENEN TEILCHEN UND NEUTRONEN

1. Einleitung
2. Aufbau und Wirkungsweise von Halbleiterzählern
3. Anwendung für die Zählung und Spektrometrie von
 α -Teilchen und Neutronen
4. Zusammenfassung
5. Literaturhinweise

1. EINLEITUNG

Zur Bestimmung der Flußverteilung in einem Reaktor werden im allgemeinen Folienmessungen durchgeführt, die eine genaue Aussage über die Neutronenflüsse im Reaktorkern erlauben. Nun nehmen solche Messungen aber naturgemäß sehr viel Zeit in Anspruch, da einmal die Folien eine gewisse Zeit der Bestrahlung ausgesetzt sein müssen, zum anderen die in den Folien induzierte Aktivität erst in einem getrennten Meßvorgang bestimmt und daraus die Flußverteilung errechnet werden kann. Eine schnellere und direktere Methode wäre, daß man an entsprechenden Stellen des Kerns Detektoren anbringt und deren Zählrate mißt oder mit einem Zählrohr verschiedene Positionen in horizontaler oder vertikaler Richtung durchfährt. Dafür ist aber Voraussetzung, daß das Zählrohr kleine Abmessungen besitzt. Diese Voraussetzungen werden von einem in den letzten Jahren entwickelten Halbleiterzähler erfüllt, der geringe Abmessungen besitzt und einige Vorteile gegenüber normalen Zählrohren oder Ionisationskammern aufweist. Im folgenden werden Eigenschaften und Anwendung dieser Halbleiterzähler beschrieben.

2. AUFBAU UND WIRKUNGSWEISE VON HALBLEITERZÄHLERN

In der Grenzschicht zwischen einem überschußleitenden Halbleitergebiet und einem solchen mit Mangelleitung baut sich als Folge der Diffusion der Ladungsträger eine Raumladungsdoppelschicht und damit eine Diffusionsspannung auf. Die von uns untersuchten Halbleiterzähler sind Siliziumkristalle die auf der einen Seite mit 5-wertigem Phosphor, auf der anderen Seite mit 3-wertigem Aluminium dotiert sind, wobei Phosphor der Donator (n-Si) und Aluminium der Akzeptor (p-Si) ist. Die verbotene Zone zwischen dem Valenzband und dem Leitfähigkeitsband, ΔE , ist bei Silizium so breit, daß bei Zimmertemperatur kein merklicher Übergang stattfindet im Gegensatz zu Germanium, das mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden muß, um einen thermischen Übergang zwischen Valenzband und Leitfähigkeitsband zu verhindern.

Die am p-n-Übergang auftretende Diffusionsspannung läßt sich zur Zählung einzelner ionisierender Teilchen heranziehen. Ein eindringendes Teilchen erzeugt eine Ionisationsspur im Kristall, wobei es Elektronen-Löcher-Paare bildet, zu deren Erzeugung eine Energie von etwa 3 eV notwendig ist. (Im Gegensatz dazu wird in einer Gasionisationskammer der vier- bis fünffache Betrag benötigt). Die entstandenen Ladungsträger diffundieren zum p-n-Übergang und werden dort im elektrischen Feld der Diffusionsspannung getrennt. Der entstehende Stromstoß führt zu einer kurzzeitigen Entladung der durch die Raumladung gebildeten Kapazität und erzeugt einen Spannungsimpuls, der an den Enden des Zählers abgegriffen werden kann.

Es ist nun wünschenswert, daß die Ionisationsspur ganz im Gebiet des elektrischen Feldes verläuft, damit die Trennung der Ladungsträger schnell vonstatten geht, und der Impuls eine steile

Anstiegsflanke besitzt. Normalerweise beträgt aber die Feldzonenbreite nur einige μ , und der Halbleiter zeigt noch keine guten Zähleigenschaften. Legt man eine äußere Spannung an, so kann man das Feld bis zum Erreichen des Durchschlags-Potentials verbreitern. Eine andere Möglichkeit zur Verbreiterung der Raumladungszone ist die Höhe der Dotierung im Si-Kristall, die aber nach der Herstellung des Zählers natürlich nicht mehr verändert werden kann. Die Breite der Feldzone W hängt mit der Dotierung zusammen nach der Formel

$$[1] \quad W = \left[2 \left(\frac{n_i}{n_n} + \frac{n_i}{P_p} \right) \ln \left(\frac{n_n \cdot P_p}{n_i^2} \right) \frac{\xi \xi_0 \cdot kT}{e^2 n_i} \right]^{1/2}$$

Der Zusammenhang mit der äußeren Spannung U ist gegeben durch

$$[2] \quad \frac{1}{C^2} = \left(\frac{W}{\xi \xi_0 F} \right)^2 \sim U$$

In den beiden Formeln bedeuten

n_i	=	Eigenleitungsdichte der Ladungsträger
n_n	=	Elektronendichte im n-Gebiet
P_p	=	Löcherdichte im p-Gebiet
ξ	=	Dielektrizitätskonstante
ξ_0	=	Influenzkonstante
k	=	Boltzmannkonstante
T	=	absolute Temperatur
e	=	elektrische Elementarladung
C	=	Kapazität der Diffusionsschicht
F	=	Fläche des Zählers

Die Größe der Eigendiffusionsspannung ist gegeben durch

$$V_n - V_p = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_n \cdot P_p}{n_i^2} \right)$$

für einen abrupten Übergang.

Diese Spannung liegt etwa in der Größenordnung von 1 Volt. Da mit dem Anlegen einer äußeren Spannung nicht nur der Feldbereich erweitert, sondern nach [2] auch die Kapazität C verringert wird, wird auch die Anstiegszeit des Impulses herabgesetzt, und die Impulshöhe steigt. Bei fester äußerer Spannung ist die Impulshöhe außerdem von der Energie der eingestrahlten Teilchen abhängig. Verläuft deren Ionisationsspur ganz im Feldgebiet, so ist der Zusammenhang zwischen Teilchenenergie und Impulshöhe linear; man kann also den Zähler in Verbindung mit einem Impulshöhenanalysator zur Energiespektrometrie verwenden. Da das Auflösungsvermögen unter anderem von Kapazität und Impulsanstiegszeit abhängt, kann bei den erreichten Anstiegszeiten von etwa 10^{-9} sec ein Auflösungsvermögen bis herunter zu 0,2 % erreicht werden.

Die Lebensdauer der Halbleiterzähler wird begrenzt durch die Zerstörung des Kristalls bei Teilchenzahlen von etwa $10^{14}/\text{cm}^2$.

3. ANWENDUNG FÜR DIE ZÄHLUNG UND SPEKTROMETRIE VON α -TEILCHEN UND NEUTRONEN

Für unsere Messungen wurden RCA-VICTOR Si-Dioden mit folgenden Charakteristiken benutzt:

Typ	A	C	D
Oberfläche	5 mm ²	20 mm ²	20 mm ²
max. Arbeitsspannung	50 V	50 V	10 V
minimal nachweisbare α -Energie	< 0,5 MeV	< 0,5 MeV	< 0,5 MeV
Signal / Rauschverhältnis			
bei 5 MeV	> 50	> 25	
Auflös.-Vermögen			
für 5 MeV α	< 1 %	< 1 %	
Kapazität	25 pF	60 pF	

Die Zähler sind lichtunempfindlich und arbeiten bei Zimmertemperatur. Da sie nur aus dem eingefaßten Si-Kristall und lose herausgeführten Anschlußdrähten bestehen, muß man sie in eine geeignete Fassung einbringen.

Die von uns verwendeten Verstärker besitzen nur eine Eingangsempfindlichkeit für Impulse negativer Polarität, der Halbleiter dagegen liefert positive Impulse. Die Umkehrung des Impulses durch Vertauschen der Anschlüsse brachte es mit sich, daß nunmehr die Einkapselung des Zählers mit zur Impulsleitung gehörte und deshalb empfindlich gegen äußere Störeinflüsse war. Es mußte also eine Abschirmung des gesamten Zählers durchgeführt

werden. Der Aufbau ist aus Abb. 1 ersichtlich.

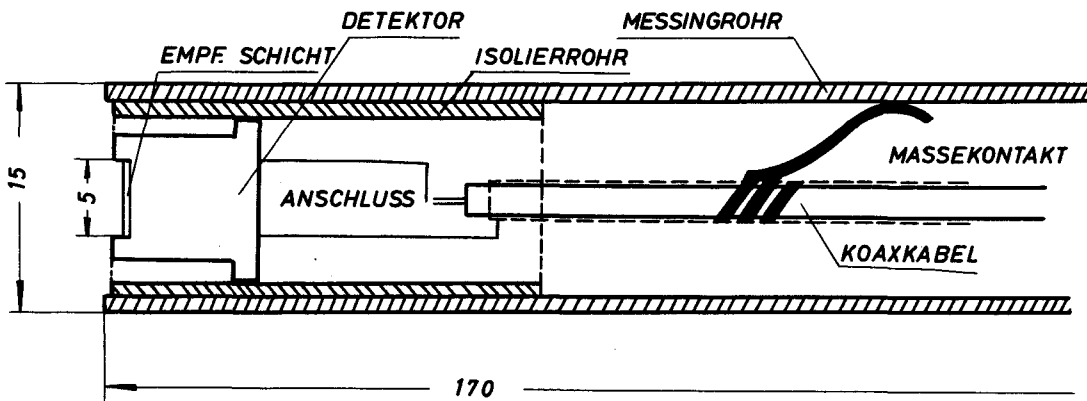


Abb. 1 DETEKTOR

Schaltung des Detektors für negativen Impulsausgang:

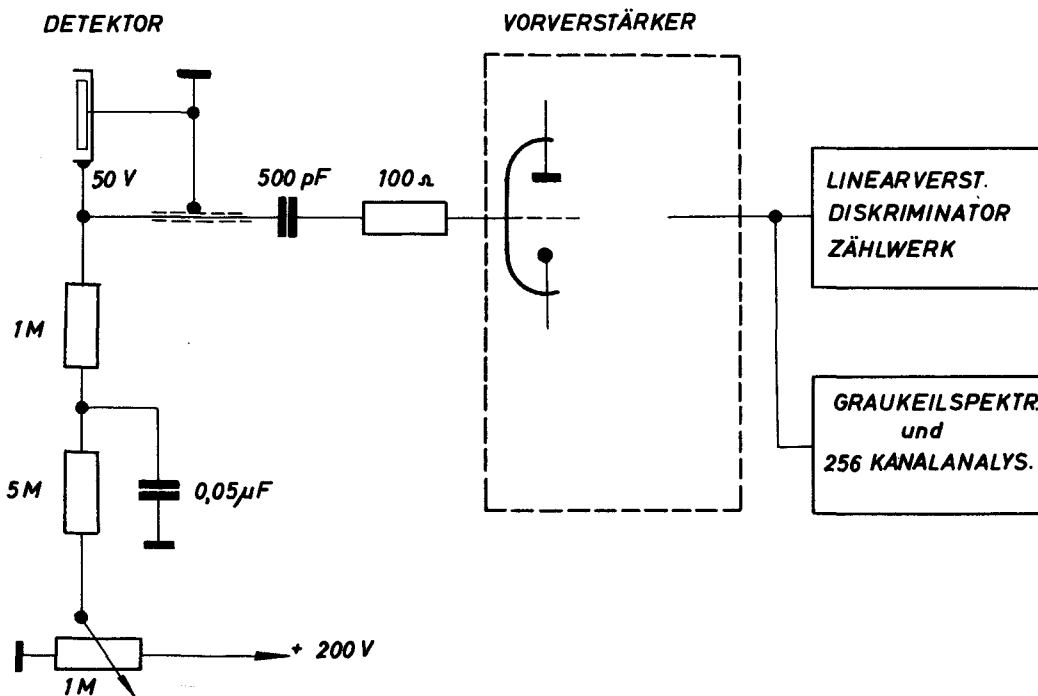


Abb. 2 SCHALTUNG DES DETEKTORS

Der Arbeitswiderstand liegt zusammen mit Spannungsversorgung und Ankopplungskapazität im Vorverstärker. Der Detektor liefert in der obigen Schaltung Impulse von etwa 1 mV, abhängig von der Teilchenenergie. Die Anstiegszeit beträgt etwa $10 \text{ m}\mu\text{sec}$. Der Detektor wurde über ein kurzes Koaxkabel an einen speziell für Halbleiterzähler entwickelten Vorverstärker, Typ Hamner N-357 angeschlossen. Dieser enthält eine Kaskadenvorstufe und einen Kathodenfolger mit einer Ausgangsimpedanz von 120Ω . Die Verstärkung ist hundertfach und nichtregelbar. Die Spannung des Eingangsrauschens ist kleiner als $10 \mu\text{V}$. Der Ausgang kann wegen seiner niedrigen Impedanz über längere Koaxialleitungen mit einem Zählgerät oder Spektrometer verbunden werden.

Zur Prüfung des Halbleiterzählers auf seine spektrometrischen Eigenschaften hatten wir zwei α -Strahler zur Verfügung und zwar:

Ra-E (Bi-210)	mit einer α -Energie von 4,94 MeV und
Pu-239	mit einer α -Energie von 5,15 MeV

Von der Präparatoberfläche bis zum Zählfenster hatten die α -Teilchen einen Luftweg von 2 mm zurückzulegen. Es ist also die Energieminderung zu berücksichtigen, die die α -Teilchen erleiden, bis sie die Fensterfläche des Zählers erreichen. Im Bereich von 5 MeV entspricht einem Luftweg von 2 mm eine Energieminderung von etwa 0,2 MeV. Weiter ist zu berücksichtigen, daß die Präparate eine endliche Schichtdicke und eine Metallunterlage besitzen. Das bedeutet im Spektrum eine scharfe Begrenzung des Peaks in Richtung der größeren Energie, während die Flanke auf der Seite der niedrigeren Energie infolge der in der Präparatschicht gestreuten und energieverminderten α -Teil-

chen nicht so steil abfällt. Dieser Effekt kann in den Spektrogrammen beobachtet werden.

Die α -Spektren wurden aufgenommen mit dem Telefunken Graukeispektrometer (s. J. Jacquemin R 105):

An die auf einem Oszillographenschirm dargestellten Impulse wurde jeweils an der Spitze des Peaks ein Dach angehängt und das Schirmbild durch einen Graukeil photographiert.

Abb. 3 zeigt das Spektrum von Ra-E, Abb. 4 das von Plutonium. Die Aufnahmedauer betrug bei Ra-E 4 min., bei Pu 15 min. Bei der letzten Aufnahme ergibt sich ein etwa gleichhoher Untergrund über den gesamten Energiebereich, der wegen der langen Aufnahmedauer vom Selbstleuchten des Oszillographenschirms herrührt. Der Peak vom Pu-239 ist aber deutlich zu erkennen. Die verschmierte Rückflanke des Ra-E-Peaks wird, wie schon beschrieben, durch Streuungen in der Präparatoberfläche verursacht.

Zusätzlich zur Graukeilmethode wurde der Ra-E-Strahler mit einem TMC-256-Kanalanalysator untersucht. Abb. 5 zeigt die Energieverteilung des α -Spektrums für drei verschiedene Spannungen am Detektor. Sieht man von der Verschmierung des Peaks durch rückgestreute α -Teilchen ab, so kann man mit dem vorliegenden Aufbau bestenfalls ein Auflösungsvermögen von 6,9 % erreichen.

An der so gewonnenen Linienbreite sind verschiedene Ursachen beteiligt: Das Verstärkerrauschen, das thermische Diodenrauschen, das Stromrauschen der Diode und schließlich eine unter-

schiedliche Sammeleffektivität infolge von Rekombinationsverlusten. Bei niedrigeren Arbeitsspannungen vermindert sich das Stromrauschen, dafür werden die Diodenkapazitäten groß, so daß bei vorgegebenen α -Energien eine höhere Verstärkung angeboten werden muß. Das führt zu einem höheren Anteil des Verstärkerrauschens. In welchem Maße Sammlungsverluste im Zähler das Auflösungsvermögen beeinflussen, hängt von Feldzonenbreite, Teilchenreichweite, Diffusionslängen und absorbierender Vorderschicht ab.

Bei entsprechend hoher Verstärkung wird im Spektrum der Anteil der γ -Strahlung des Präparates sichtbar. Die durch ihn verursachten Impulshöhen sind wegen der geringen Ionisationsdichte der γ -Strahlung so niedrig, daß sie leicht gegen den α -Anteil diskriminiert werden können. Die Impulshöhen für die 4,94 MeV α -Energie des Ra-E wurden durch Eichmessungen mit einem Präzisionsimpulsgeber ausgemessen, indem Impulse verschiedener Höhe auf den Eingang des Vielkanalspektrometers gegeben und die zugehörige Kanallage bestimmt wurde. Mit der angegebenen Verstärkung des Vorverstärkers ergab sich für die α -Energie von 4,94 MeV eine Impulshöhe von etwa 2,2 mV an der Diode bei 50 Volt Arbeitsspannung.

Ein weiteres Anwendungsgebiet für den Halbleiterzähler ist der Nachweis und die Zählung von Neutronen. Es bestehen prinzipiell keine Schwierigkeiten, Zähler für ionisierende Strahlung auch für Neutronen empfindlich zu machen, indem man einen Spaltprozeß, eine (n, α) -Reaktion oder einen Protonen-Rückstoßprozess benutzt. Da für den Nachweis von thermischen Neutronen eine vielfältige Anzahl von Detektoren zur Verfügung steht, haben wir uns vorläufig nur für den Nachweis schneller Neutronen interessiert.

Wird ein Halbleiterzähler mit einer genügend Wasserstoff enthaltenden Substanz (z. B. Paraffin oder Plexiglas) umgeben, so können die aus einem (n,p)-Rückstoßprozess erzeugten Protonen im Zähler nachgewiesen werden. Zusätzlich erzeugen hohe Neutronenenergien über Stoßprozesse im Si-Kristall selbst einen Untergrund an Impulsen, die nicht klein gegen die von Protonen erzeugten Impulse sind.

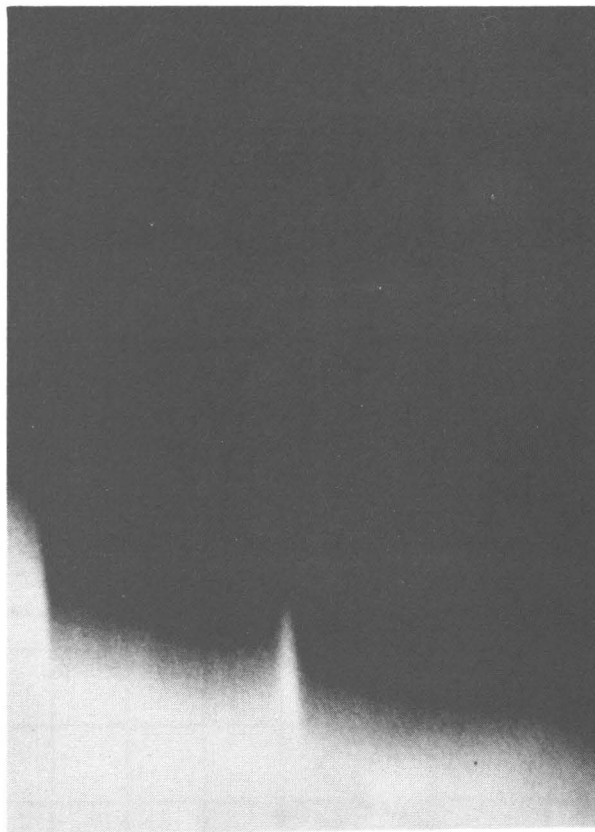
Der beschriebene Zähler wurde mit einer Plexiglaskappe bedeckt, die über der empfindlichen Oberfläche des Zählers eine Dicke von 1 mm besitzt. Testpräparat war eine Po-Be-Neutronenquelle mit einer Emission von etwa 5×10^5 n/sec. Abb. 6 zeigt das Spektrum der Neutronenquelle einmal mit aufgesetzter Plastikplatte und einmal ohne diese Zwischenlage. Beiden Messungen ist der γ -Peak bei niedriger Kanalzahl gemeinsam. Vom 30. Kanal ab ist eine deutliche Trennung der beiden Anteile wahrnehmbar, wenn auch nur für verhältnismäßig niedrige Zählraten. Versuche mit einer gepulsten Neutronenquelle, die eine wesentlich höhere Emission von Neutronen besitzt, sind geplant. Die Zählleistung als Funktion der Energie ist bis jetzt noch nicht gemessen worden; jedoch kann diese durch die Möglichkeit abgeschätzt werden, daß Rückstoßprotonen die Paraffin- oder Plexiglasbedeckung verlassen und mit einer gewissen Minimalenergie in den Halbleiter eindringen. Detaillierte Überlegungen verschiedener Autoren über den differentiellen Wirkungsquerschnitt für Neutron-Proton-Streuung und Protonenenergiebereichs-Beziehungen in Paraffin zeigen ein fast lineares Anwachsen der Zählleistung mit der einfallenden Neutronenenergie für eine dicke Paraffinauflage.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen mit Halbleiterzählern haben gezeigt, daß für verschiedene Anwendungsgebiete der Registrierung und Spektrometrie geladener Teilchen und Neutronen Vorteile gegenüber konventionellen Detektoren bestehen. Die Vorteile sind gutes Auflösungsvermögen, niedrige Arbeitsspannungen und kleine räumliche Ausdehnung. Nachteile bestehen vor allem in der notwendigen großen Verstärkung der erzeugten Impulse und in einer relativ kurzen Lebensdauer bei Bestrahlungen von etwa 10^{13} Teilchen pro cm^2 ; dieses spielt vornehmlich eine Rolle bei Messungen in starken Neutronenfeldern.

LITERATURHINWEISE

- 1.) G. Dearnlay u. A. B. Whitehead, Research Memo
AERE R/2956 Mai 1959
- 2.) RCA Victor Company LTD Montreal:
Semiconductor Junction Alpha Detectors
- 3.) Babcock, R. V., E. D. Wollay et al., Nucl. Sc. and
Engin. Vol. 1, Nr. 2, Dec. 1958
- 4.) Babcock, R. V. et al., Nucleonics 4, S. 116, Apr. 1959
- 5.) Friedland, S. S. et al., Nucleonics Febr. 1960, S. 54
- 6.) Steinberg, R., Nucleonics, Febr. 1960, S. 85
- 7.) Engler, H. D., Nukleonik 6, Nov. 1960, S. 16



Pu 239



Ra-E

Abb. 5

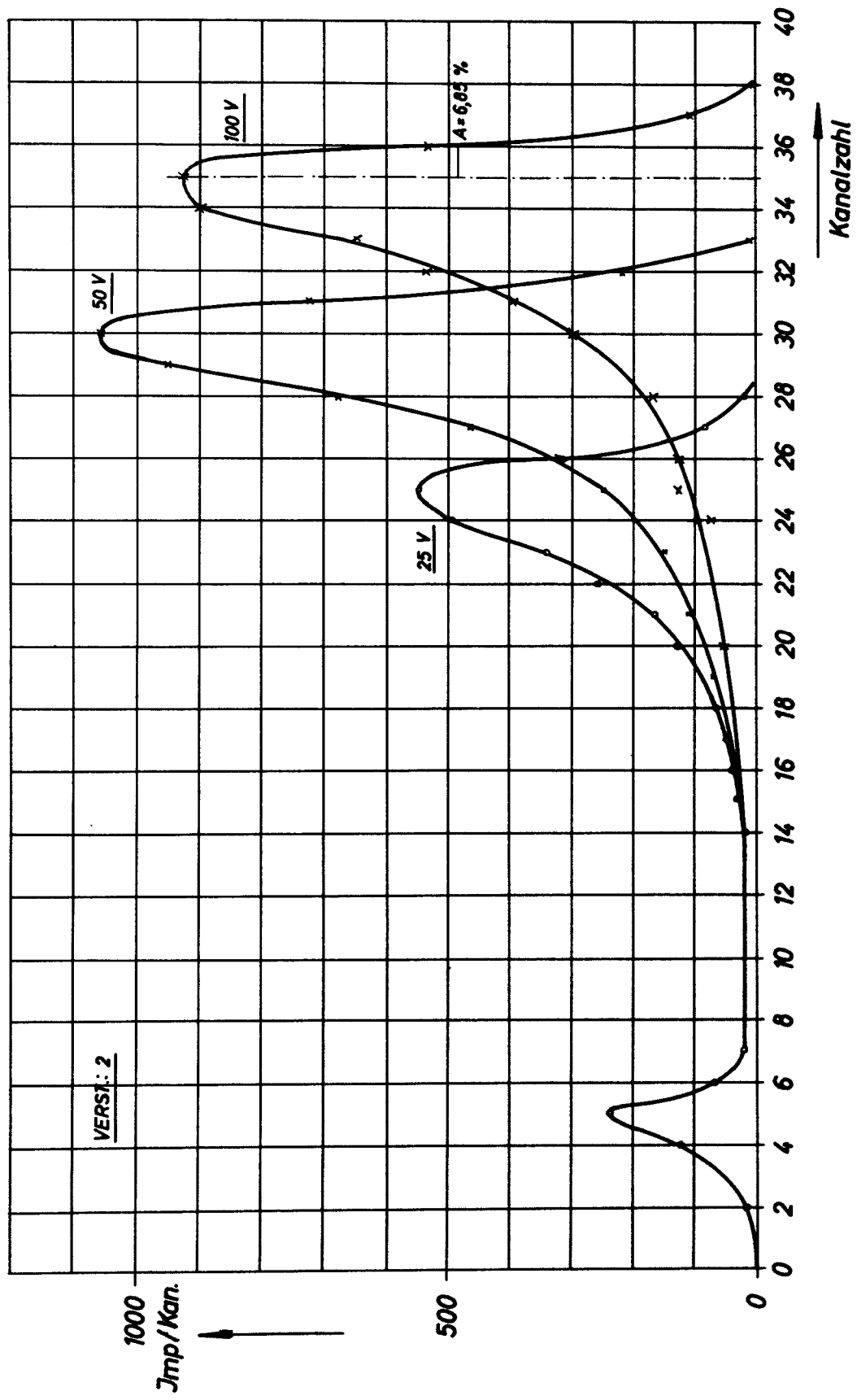


Abb. 6

